

ЭПТ 2018



ACED 2018

УДК 621.316.7

ИМИТАЦИОННАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОГНОЗИРУЮЩЕГО АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫМ СИЛОВЫМ ФИЛЬТРОМ

MODELING AND EXPERIMENTAL VERIFICATION OF A PREDICTION ALGORITHM FOR CONTROLLING AN ACTIVE POWER FILTER

Токарев Вадим Геннадьевич, ст. преподаватель кафедры вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: v.tokarev@corp.nstu.ru. Тел.: +73833460492

Брованов Сергей Викторович, д-р. техн. наук, доцент, проректор по учебной работе Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: brovanov@corp.nstu.ru. Тел.: +73833460422

Дыбко Максим Александрович, канд. техн. наук, доцент, зам. зав. кафедрой электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: dybko@corp.nstu.ru. Тел.: +73833460864

Удовиченко Алексей Вячеславович, канд. техн. наук, доцент кафедры электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: udovichenko@corp.nstu.ru. Тел.: +73833464814

Vadim G. Tokarev, senior lecturer at the computer engineering department, Novosibirsk State Technical University, 20, Karl Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: v.tokarev@corp.nstu.ru. Ph.: +73833460492

Sergey V. Brovanov, PhD., professor, Vice Rector for Academic Activities, Novosibirsk State Technical University, 20, Karl Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: brovanov@corp.nstu.ru. Ph.: +73833460422

Maxim A. Dybko, PhD., associate professor, deputy head of the Electronics and Electrical Engineering Faculty, Novosibirsk State Technical University, 20, Karl Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: dybko@corp.nstu.ru. Ph.: +73833460864

Aleksey V. Udovichenko, PhD., associate professor of the Electronics and Electrical Engineering Faculty, Novosibirsk State Technical University, 20, Karl Marx Ave., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: udovichenko@corp.nstu.ru. Тел.: +73833464814

Аннотация: В данной статье рассмотрен вопрос улучшения качества тока в трехфазной распределительной сети с использованием активного силового фильтра. Приведена структура системы управления активным силовым фильтром, реализующая прогнозирующий алгоритм. Представлены результаты имитационного моделирования активного силового фильтра на базе трехфазного трехуровневого инвертора напряжения. Проведено исследование прототипа активного силового фильтра на экспериментальной установке.

Abstract: In this paper, the problem of power quality improvement in the three-phase distribution network using an active power filter is considered. The structure of the control system of the active power filter is outlined. Modeling results of the power filter based on a three-phase three-level voltage inverter are presented. The performance of the active power filter has been tested using an experimental set-up. The results of modeling have been successfully verified experimentally.

Ключевые слова: активный силовой фильтр; прогнозирующий алгоритм управления; трехуровневый инвертор.

Key words: active power filter; prediction-based method; three-level inverter.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время, активное развитие и повсеместное применение систем силовой электроники, таких как полупроводниковых выпрямителей, импульсных преобразователей энергии, регуляторов переменного тока, преобразователей частоты, вывело на передний план проблему качества электроэнергии в распределительных сетях. Эти устройства, из-за своих нелинейных характеристик, значительно искажают ток в распределительной сети, что приводит к возрастанию потерь при передаче и преобразовании электроэнергии, дополнительному нагреву элементов распределительной сети, ускоренному старению изоляции, появлению токов, превышающих допустимые нормы в нулевом проводе [1]. Для борьбы с этим явлением применяют активные силовые фильтры (АСФ), которые компенсируют искажения, вносимые в сеть нелинейной нагрузкой [2-7]. Существуют различные варианты исполнения АСФ, но наиболее распространенный по применению из них это параллельный трехфазный трехпроводной АСФ. Блок-схема такого фильтра представлена на рис.1.

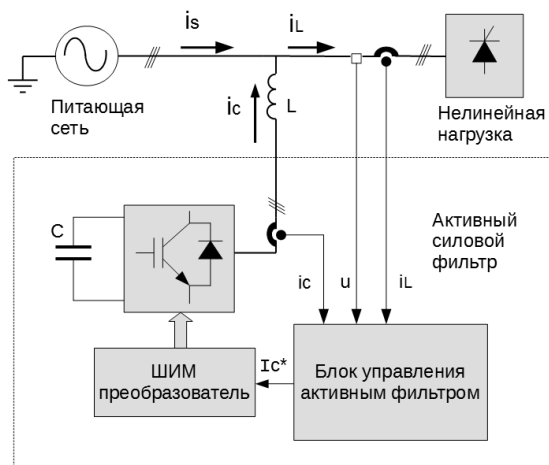


Рис. 1. Обобщенная структура параллельного активного силового фильтра.

Там же были предложены и различные способы управления АСФ, среди которых определенный интерес представляет способ, основанный на выделении активных и реактивных компонент тока [7]. Блок-схема системы управления, реализующая способ выделения активных и реактивных компонент тока, представлена на рис.2.

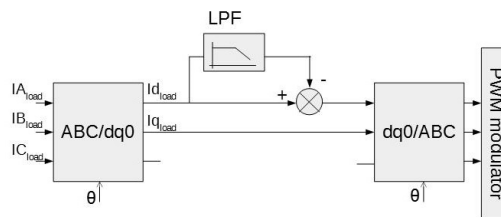


Рис. 2. Система управления АСФ, реализующая способ выделения активных и реактивных компонент тока.

Блок $ABC/dq0$ последовательно осуществляет преобразования Э.Кларка и Парка-Горева, т.е. переход к вращающейся системе координат, синхронной с напряжением питающей сети. Синхронизация осуществляется посредством системы фазовой автоподстройки частоты (PLL) [8,9]. При этом проекции вектора тока нагрузки на оси d и q представляют собой активную и реактивную его составляющие. Высшие гармоники тока нагрузки можно представить как колебания i_{dload} и i_{qload} относительно их средних значений [7]

$$i_{dload} = \overline{I}_{dload} + \tilde{i}_{dload} \quad (1)$$

$$i_{qload} = \overline{I}_{qload} + \tilde{i}_{qload} \quad (2)$$

Где \overline{i}_{dload} - среднее значение тока нагрузки по оси d есть активная компонента тока нагрузки, а \overline{i}_{qload} - среднее значение тока нагрузки по оси q есть реактивная компонента, \tilde{i}_{dload} и \tilde{i}_{qload} компоненты высших гармоник по осям d и q соответственно. Таким образом, принципом формирования сигнала-задания на ток компенсации является исключение активной компоненты тока нагрузки с помощью фильтра низкой частоты (ФНЧ) с частотой среза равной 25 Гц и принятие оставшихся значений равными по модулю, но обратными по знаку

$$\begin{aligned} i_{dref} &= -\tilde{i}_{dload} \\ i_{qref} &= -(\overline{i}_{qload} + \tilde{i}_{qload}) \end{aligned}$$

Недостатки данного метода широко обсуждаются в научной литературе [10-13]. Один из недостатков - применение ФНЧ для вычисления средних значений активной компоненты тока нагрузки. Вследствие большой постоянной времени ФНЧ, среднее значение тока нагрузки вычисляется с некоторым запаздыванием, относительно изменения активной компоненты тока нагрузки, что не позволяет полностью компенсировать гармонические составляющие тока нагрузки. Также препятствием для полной

компенсации гармонических составляющих тока нагрузки является дискретный режим работы системы управления АСФ, при этом возникает задержка между моментом времени, в котором происходит измерение токов нагрузки и моментом времени, когда система управления АСФ сформирует сигнал-задание на ток компенсации [10,11].

Для решения этих проблем был предложен метод [10], который предполагает накопление отсчетов мгновенных значений тока нагрузки по осям d и q за предыдущий период колебания тока питающей сети в виде некоторого массива данных. Значение тока компенсации в момент времени $t(n+1)$, вычисляется исходя из значения, сохраненного в массиве данных в предыдущий период $t(n-(k-2))$. Здесь n – номер отсчета в периоде, k – число отсчетов за полный период колебания питающей сети. Таким образом, появляется возможность спрогнозировать изменение тока нагрузки, имея информацию о его характере в предыдущем периоде.

При этом, вычисление среднего значения активной компоненты тока нагрузки производится «плавающим усреднением» (*Floating Average*) согласно выражению (3).

$$id_{load0}(n) = \frac{1}{k} \sum_{n-(k-1)}^n id_{load}(n) = \frac{1}{k} [id_{load_{sum}}(n-1) - id_{load}(n-k) + id_{load}(n)] \quad (3)$$

Недостатком данного метода является фиксированный интервал упреждения, равный удвоенному шагу дискретизации (*Sample time*), учитывающий только временную задержку в системе управления АСФ. Подобный подход был предложен в [12] для уменьшения влияния индуктивности сглаживающего реактора АСФ на формирование тока компенсации при резких перепадах тока нагрузки.

Способ устранения данного недостатка, а именно – подстройку интервала упреждения в зависимости от тока нагрузки был предложен авторами в работе [14]. Особенностью способа является сравнение количества отсчетов по оси q , значение которых превышает среднее в выборке (накопленных в массиве данных за полный период колебания питающей сети) более чем на половину в положительную сторону с количеством отсчетов, значение которых превышает среднее в выборке более чем на половину в отрицательную сторону, что эквивалентно суммарной длительности импульсов тока, мгновенные значения которых имеют значительные

отклонения от ожидаемых для синусоидальной формы сетевого тока величин. Затем, в зависимости от результатов сравнения производится коррекция дискретного интервала упреждения m в большую или меньшую сторону, при этом длительность временного интервала упреждения составляла

$$t_{pred} = m * t_s$$

Где t_s – интервал дискретизации (*Sample time*), m – дискретный интервал упреждения.

В той же работе [14] авторами была предложена выполненная в среде имитационного моделирования *Psim* идеализированная модель АСФ, построенного на базе двухуровневого инвертора напряжения, однако, в настоящее время широкое распространение получили многоуровневые топологии. В этой модели не учитывались реальные параметры дискретной системы управления и силовых переключающих элементов. Также не были проведены экспериментальные исследования предложенного алгоритма на реальном АСФ.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Таким образом, с целью подтверждения эффективности и универсальности прогнозирующего алгоритма [14] на данном этапе исследования актуальным является экспериментальная верификация предложенного алгоритма на реальном АСФ. При этом сам АСФ может быть построен на базе инвертора напряжения перспективной многоуровневой топологии. Для достижения поставленной цели необходима разработка имитационной модели АСФ на базе трехфазного трехуровневого инвертора напряжения, по характеристикам наиболее приближенной к реальной системе, реализация предложенного алгоритма управления АСФ как в имитационной модели, так и в реальной экспериментальной установке.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

В ходе работы, в среде имитационного моделирования *Psim* была разработана модель АСФ на базе трехфазного трехуровневого инвертора напряжения, блок-схема которой представлена на рис.3. При разработке учитывались особенности моделирования многоуровневых инверторов напряжения [15]. Пассивные и активные компоненты модели, а также датчики токов и напряжений реализованы с использованием базовых элементов среды имитационного моделирования *Psim*. Функции системы управления, имитирующей работу дискретной системы по формированию управляющих импульсов для силовых

переключающих элементов с заданной задержкой неперекрывтия (*Dead Time*) для исключения протекания сквозного тока в переключающих элементах инвертора, а также функции блока синхронизации с трехфазной распределительной сетью (блок *PLL*) и блоков пропорционально-интегральных регуляторов напряжения звена постоянного тока выполнены в виде программного блока динамически подключаемой библиотеки. Алгоритм управления работой АСФ реализован на языке программирования С, что позволяет переносить исходный код алгоритма из модели в реальную систему с минимальными изменениями.

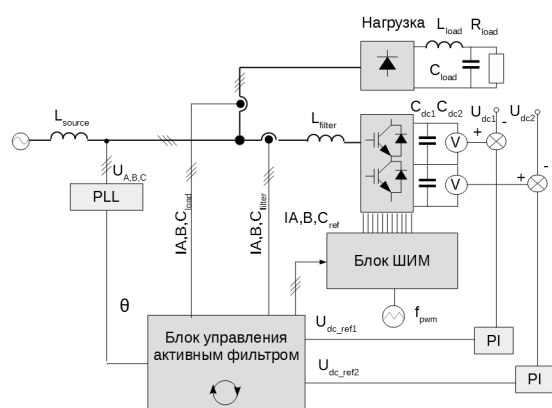


Рис. 3 Блок-схема модели АСФ

В ходе работы было проведено моделирование работы АСФ с параметрами, представленными в таблице.

Таблица.

Параметры имитационной модели АСФ	
Линейное действующее входное напряжение U_s	45 В
Частота входного напряжения	50 Гц
Индуктивность входной линии L_{source}	0.45 мГн
Индуктивность уравнивающего реактора фильтра L_{filter}	1.4 мГн
Емкость накопительных конденсаторов звена постоянного тока C_{dc1} и C_{dc2}	1500 мкФ
Напряжение постоянного конденсаторе фильтра $U_{dc1} + U_{dc2}$	250 В
Индуктивность нелинейной нагрузки L_{load}	1.4 мГн
Емкость нелинейной нагрузки C_{load}	2 мкФ
Частота задающего генератора ШИМ F_{pwm}	10.5 КГц
Задержка неперекрывтия (<i>DeadTime</i>)	5 мкс
Интервал дискретизации, t_s	95.24 мкс
Число элементов буфера, k	204

Диаграммы токов нагрузки и сети, полученные в ходе моделирования с отключенным режимом прогнозирования и с включенным режимом прогнозирования приведены на рис.4 и рис.5 соответственно.

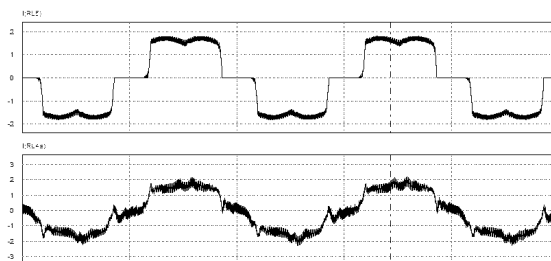


Рис.4 Диаграммы токов нагрузки (вверху) и сети (внизу) при работе АСФ с отключенным режимом прогнозирования.

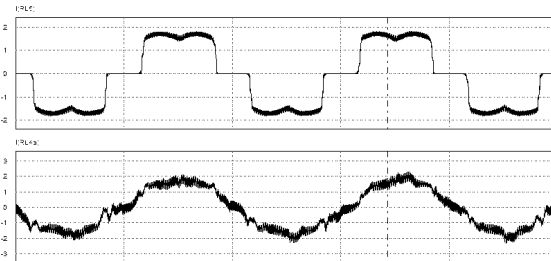


Рис.5 Диаграммы токов нагрузки (вверху) и сети (внизу) при работе АСФ с включенным режимом прогнозирования.

Анализ приведенных диаграмм показывает, что суммарный коэффициент гармонических составляющих (СКГС) тока сети снижается от 22% до 18% при включении режима прогнозирования. При этом СКГС тока нагрузки составляет 29%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для верификации предложенного алгоритма была создана экспериментальная установка, представляющая собой трехфазный трехуровневый инвертор напряжения, выполненный на биполярных транзисторах с изолированным затвором *Semikron SK30MLI066* с драйверами *Semikron SKHI22BH4R* и систему управления собранную на отечественном микроконтроллере производства АО "ПКК Миландр" 1986BE1TK. В качестве нелинейной нагрузки использовался полупроводниковый выпрямитель *Semikron SKD30/12A1*, нагруженный на реостат. Общий вид экспериментальной установки показан на рис.6.

Экспериментальные исследования проводились при тех же параметрах, что и имитационное моделирование (см. таблицу).

В ходе проведения экспериментов, алгоритм работы АСФ был перенесен в систему управления на микроконтроллере, эюры токов нагрузки и сети снимались с соответствующих проводников фазы *A* посредством токового пробника *PA-622* и цифрового четырехканального осциллографа АКИП 4126/3А.

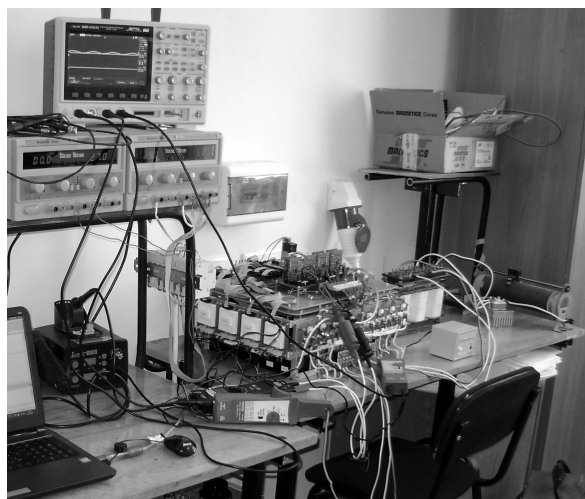


Рис. 6 Общий вид экспериментальной установки.

Осциллограммы токов нагрузки и сети при выключенном и включенном режимах компенсации гармонических составляющих тока нагрузки представлены на рис.7 и рис.8 соответственно, а осциллограммы токов сети с отключенным и включенным режимом прогнозирования представлены на рис.9 и рис.10 соответственно.

Сравнив диаграммы токов, полученные при моделировании и в процессе проведения экспериментов можно сделать вывод о том, что результаты натурных экспериментов соответствуют данным, полученным в ходе имитационного моделирования, предложенная модель адекватно соответствует реальному АСФ, выполненному на базе трехфазного трехуровневого инвертора напряжения. Также экспериментальное исследование показало эффективность предложенного алгоритма.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных в рамках данной работы исследований было выполнено имитационное моделирование АСФ, реализованного на базе трехфазного трехуровневого инвертора напряжения и работающего под управлением прогнозирующего алгоритма. Также были проведены эксперименты на реальном прототипе АСФ с идентичными модели параметрами.

Как имитационным моделированием, так и экспериментально показано, что применение

прогнозирующего алгоритма управления в АСФ позволяет снизить суммарный коэффициент гармонических составляющих тока сети примерно на 4%. Также исследования показали, что данный алгоритм можно использовать в существующих АСФ различной топологии.

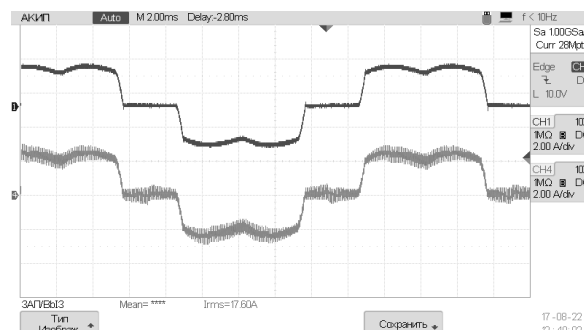


Рис.7 Осциллограммы токов нагрузки (вверху) и сети (внизу), снятые при отключенном режиме компенсации гармонических составляющих тока.

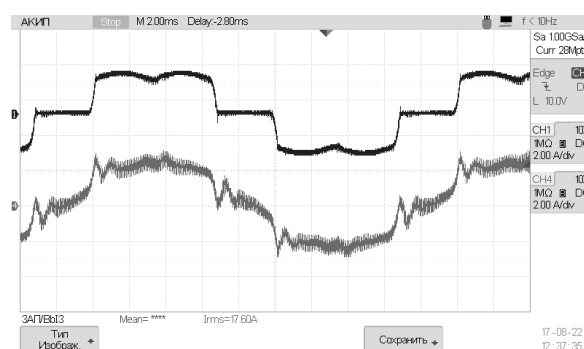


Рис.8 Осциллограммы токов нагрузки (вверху) и сети (внизу), снятые при включенном режиме компенсации гармонических составляющих тока.

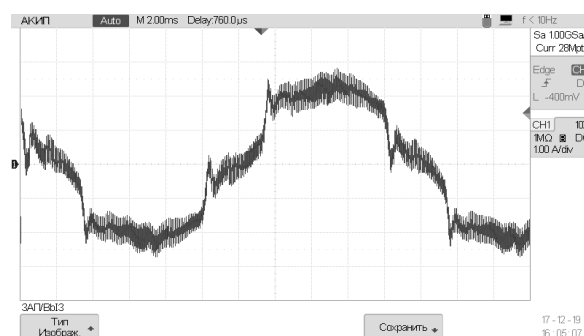


Рис.9 Осциллограмма тока сети, снятая при работе АСФ с отключенным режимом прогнозирования.

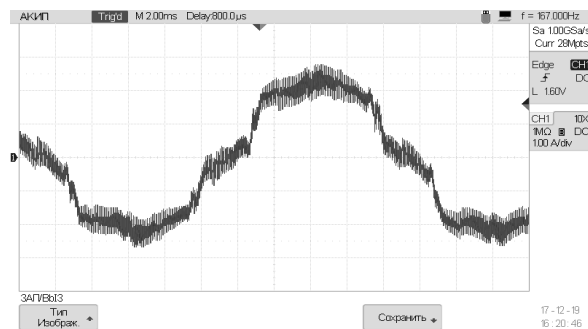


Рис.10 Осциллограмма тока сети, снятая при работе АСФ с включенным режимом прогнозирования.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Новосибирской области в рамках научного проекта № 17-48-543169

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning, H. Akagi, E. H. Watanabe, M. Aredes. – USA: John Wiley & Sons, 2007, p.379, ISBN 978-0-470-10761-4.
2. Akagi, H. New Trends'in Active Filters for Power Conditioning / H. Akagi // IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, Iss. 6, P. 1312 - 1322.
3. Поднебесная, С. К. Силовой параллельный активный фильтр с повышенной эффективностью / С. К. Поднебесная, Бурлака В. В., Гулаков С. В. // Электротехника. – 2013. – № 6. – С. 15–20.
4. Люtareвич, А. Г. Оценка эффективности использования активного фильтра гармоник в системах электроснабжения / А. Г. Люtareвич, С. Ю. Долингер // Омский научный вестник. – 2010. – № 1. – С. 133–136.
5. Нос, О. В. Система управления силовыми токами компенсации мгновенной неэффективной мощности / О. В. Нос, С. А. Харитонов // Электротехника. – 2015. – № 2. – С. 28–34.
6. Mendalek, N. Modeling and nonlinear control of shunt active power filter in the synchronous reference frame /N. Mendalek, Al-Haddad // Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power. - 2000. - Vol. 1, - P. 30 – 35.
7. Soares, V. An instantaneous active and reactive current component method for active filters / V.

Soares, P. Verdelho, G. D. Marques // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2000. – Vol. 15, Iss 4. – P. 660–669

8. Kaura V. Operation of a phase locked loop system under distorted utility conditions / V. Kaura, V. Blasko // IEEE Transactions on Industry Application. - 1997. - Vol. 33. Iss. 1, - P. 58–63.
9. Chung S.-K. Phase-locked loop for grid connected three-phase power conversion systems / S.-K. Chung. // IEE Proceeding Electric Power Application.- 2000. - Vol. 147. Iss. 3, - P. 213–219.
10. Routimo M. A Novel Simple Prediction Based Current Reference Generation Method for an Active Power Filter/ M. Routimo, M. Salo, H. Tuusa // 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference Aachen, Germany. - 2004. – P. 3215-3220.
11. Pettersson S. A Simple Prediction Based Current Reference Generation Method for a Four-Wire Active Power Filter / S. Pettersson, M. Routimo, M. Salo, H. Tuusa // 12th International Power Electronics and Motion Control Conference. - 2006, - P. 1648 – 1653. ISBN: 1-4244-0121-6.
12. Sozanski P.S. Control circuit for active power filter with an instantaneous reactive power control algorithm modification / Przegląd Elektrotechniczny (ElectricalReview). – 2011. R.87, NR 1/2011. – P. 67-71.
13. Thejaswi S. Improved Active Power Filter Performance for Renewable Power Generation System with Buck Boost Converter using Predictive Control Algorithm / M.Thejaswi, V.Ramakrishna, M.Sreenivasulu // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology.- 2015. - Vol. 4, Iss. 11, - P. 10436 – 10446.
14. Improving the Active Power Filter Performance with a Prediction-based Control Method / Vadim G. Tokarev, Sergey V. Brovanov, Alexander A. Yakimenko, Aleksey V. Sidorenko, Denis V. Solovlev // The 17 international conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM 2016 : proc., Altai, Erlagol, 30 June – 4 July 2016. – Novosibirsk : NSTU, 2016. – P. 577-582. - ISBN 978-5-94301-628-8 . - DOI: 10.1109/EDM.2016.7538802.
15. Dybko M. A. Mathematical simulation technique for power systems based on diode-clamped multilevel VSC. / M. A. Dybko, S. V. Brovanov, S. A. Kharitonov // EuroCon 2013, Croatia, Zgreb, 1–4 July 2013 : [abstracts]. – [USA] : IEEE, 2013. – P. 941–947. - DOI: 10.1109/EUROCON.2013.6625095.